

QUENCHING AND CHANGES IN DURATION
OF LUMINESCENCE IN THE SENSITIZED PHOSPHORESCENCE
OF AROMATIC COMPOUNDS

V. L. Yermolayev

FACILITY FORM 802

N 65-32261	
(ACCESSION NUMBER)	(THRU)
11	1
(PAGES)	(CODE)
	06
(NASA CR OR TMX OR AD NUMBER)	(CATEGORY)

GPO PRICE \$ _____

CFSTI PRICE(S) \$ _____

Hard copy (HC) 1.00

Microfiche (MF) 50

ff 653 July 65

Translation of "Tusheniye i izmeneniye dlitel'nosti
svecheniya pri sensibilizovannoy fosforestsentsii
aromaticheskikh soyedineniy."

Doklady Akademii Nauk SSSR, Vol. 102, No. 5,
pp. 925-928, 1955.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION
WASHINGTON

AUGUST 1965

From: Doklady Akademii nauk SSSR [Transactions of the Academy of Sciences USSR].

Fizika [Physics]. Vol. 102, No. 5, 925-928, 1955

V. L. Yermolaev

QUENCHING AND CHANGES IN THE DURATION OF LUMINESCENCE IN
THE SENSITIZED PHOSPHORESCENCE OF AROMATIC COMPOUNDS.

Presented by Academician A. N. Terenin on 2 December 1954.

This article deals with an investigation of the mechanism of sensitized phosphorescence [1,2], involving a study of the quenching of the luminescence of an energy donor by the acceptor and the decay time for the luminescence of the components.

The value of τ for the luminescence of aromatic aldehydes and ketones was measured by means of an oscillographic phosphoroscope* of the Tolstoy-Feofilov system. This instrument permits determination of the decay time of exponentially damping bright luminescence in the region of 10^{-3} to 10^{-4} sec with an accuracy of 2 to 3 %, the error introduced by the longer phosphorescence of naphthalene being eliminated immediately. A part of the measurements were performed with a two-disk Becquerel phosphoroscope (speed of 33 rps). The decay time of the persistent phosphorescence of carbazole and diphenylamine was measured with the aid of a two-disk phosphoroscope (0.28 rps) and a FEU-17 photomultiplier tube connected to an M-95 mirror galvanometer with a sensitivity of 10^{-8} amp per scale division operating as a ballast galvanometer. An SVDSH-250 mercury-arc lamp was employed in all cases to excite luminescence; the light from this lamp passes through a quartz condenser to the cell with the solution to be investigated, the cell being placed in an unsilvered Dewar vessel with liquid air. A combination of VG-22 (5 mm) and IG-1 (10 mm) light filters was used to separate the group

*The author expresses his deep gratitude to V. A. Arkhangel'skaya for giving him the opportunity to make these measurements on her laboratory equipment.

of lines near 3660 Å. Quenching of the luminescence of benzophenone by naphthalene was measured by an FEU-17 photomultiplier tube and an M-95 galvanometer in the stationary state with crossed light filters. A mixture of two parts by volume of 96% ethanol and one part by volume of 98% ether which had been purified by repeated distillation was used as the solvent which formed an ultra low-expansion vitreous medium at low temperature. As the coefficient of compression for this mixture when the temperature is lowered from room temperature to that of liquid air [5], this makes it possible to compute the true concentration of the solution at -180° .

The substances in whose solutions we observed sensitized phosphorescence are listed in Table 1. Any binary combination of a substance in the left (lower) half of the table with a substance in the right (upper) half produces radiationless energy transfer from the triplet states of donor molecules to acceptor molecules with excitation of only the first component. The presence of such energy transfer was established not only by the appearance of sensitized phosphorescence, but also by a reduction in the lifetimes of energy donor molecules in the metastable state and the presence of energy acceptors. In the case of carbazole and diphenylamine in the presence of naphthalene, energy transfer could be established only by means of the last method. Table 1 also shows the values of electron transitions from the triplet level to the ground level and the lifetimes of molecules in the triplet state as measured in the present project.

By employing benzaldehyde + naphthalene, benzophenone + naphthalene, benzophenone + α -methyl naphthalene, carbazole + naphthalene, and other

Table 1

Energy Donors	Triplet Level * in cm^{-1}	Phosphorescence Decay Time in seconds °	Long-Wave Boun- dary of Absorp- tion in cm^{-1}
1 Benzaldehyde	25,200	1.5×10^{-3}	26,750
2 Benzophenone	24,200	4.7×10^{-3}	26,000
3 Acetophenone	25,850	2.3×10^{-3}	27,500
4 Ethyl-phenyl ketone	--	3.7×10^{-3}	27,500
5 o-oxy benzaldehyde	24,600	--	26,000
6 Benzoin	25,650	$2 - 4 \times 10^{-3}$	28,000
7 Diphenylamine	25,200 **	1.85	31,000
8 Carbazole	24,480 **	7.25	29,500
Energy Acceptors	Triplet Level * in cm^{-1}	Phosphorescence Decay Time in seconds °	Long-Wave Boun- dary of Absorp- tion in cm^{-1}
1 Naphthalene	21,300	2.30	31,000
2 Diphenyl	22,800	4.4	34,000
3 α -methyl naphthalene	21,200 **	---	30,500
4 α -chloro naphthalene	20,700	0.30	--

*The height of the triplet level above the ground level was determined by the position of the maximum of the first shortest wave band of the phosphorescence spectrum we obtained with the spectrophotometric apparatus consisting of a glass monochromator and photomultiplier tube.

**The data are taken from reference [8].

systems, we have succeeded in showing that the presence of an energy acceptor reduces the lifetime of a phosphorescing energy donor molecule*.

The principal difficulty in measuring reductions in the decay time τ consisted in obtaining sufficiently high concentrations of the energy acceptors; the highest concentration of naphthalene we obtained was 4×10^{-1} mole/liter; in its presence, the decay time τ of benzophenone was reduced by 25%. α -methyl naphthalene, whose solubility was considerably higher than the solubility of naphthalene turned out to be the most suitable substance.

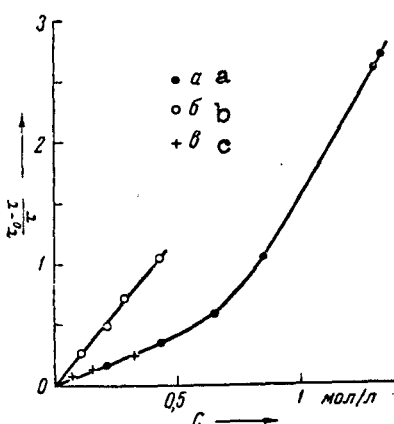


Figure 1

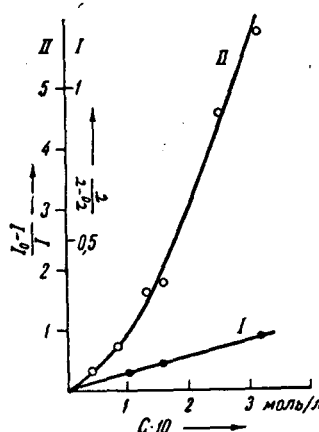


Figure 2

Figure 1a shows the time constant of the quenching of the phosphorescence of benzophenone as a function of the concentration of α -methyl naphthalene. The quantity $\frac{\tau_0 - \tau}{\tau_0}$, plotted along the y-axis is proportional to the ratio of the probabilities of transfer and quenching in time with the initial probability of transition from the phosphorescence level of the energy donor

*According to the ideas developed by S. I. Vavilov [6,7], the following two processes take place in resonance migration of the energy of electron excitation in fluorescing solutions: 1) resonance interaction between molecules which is time-dependent; and 2) a "static interaction" which is not time-dependent. The conclusion of a decrease in the luminescence decay time of a substance giving off energy is a consequence of the assumption of the presence of the first process. Since this has been observed in our case, we can speak of resonance interaction developing in time between donor molecules and the energy acceptor in sensitized phosphorescence.

to the normal level. It can be seen from Figure 1 that this quantity which characterizes the relative probability of energy transfer increases linearly with an increase in the concentration of the energy acceptors in the region of concentrations of less than 5×10^{-1} mole/liter for the latter. This quantity may grow more rapidly later, but determining what function of the concentration can describe this relationship is difficult since the accuracy of determinations of the decay time τ in the presence of such high concentrations of α -methyl naphthalene is significantly lower than in low concentrations of the latter due to simultaneous very strong quenching of the luminescence of energy donors. Figure 1 also shows the quenching time of carbazole (b) and of benzaldehyde (c) as a function of the concentration of naphthalene.

A comparison of the quenching of benzophenone by naphthalene with different concentrations of naphthalene (II) and the reduction in the decay time τ (I) in the very same solutions is presented in Figure 2. The concentration of benzophenone is constant and equal to 5×10^{-2} mole/liter. The value of quenching determined by the value of $\frac{I_0 - I}{I}$ (where I_0 is the intensity in the absence of the quenching agent, I is the intensity in the presence of naphthalene) and the reduction in the lifetime of the metastable state of benzophenone $\frac{\tau_0 - \tau}{\tau}$ are plotted along the y-axis. The fact that quenching increases with an increase in the concentration of naphthalene considerably more rapidly than the quantity $\frac{\tau_0 - \tau}{\tau}$ shows that the transfer of the excitation energy and the quenching of luminescence of energy donors connected with the former is accompanied by the instantaneous process of quenching of the donor by the acceptor.

Observations of the phenomenon of sensitized phosphorescence is not restricted to aromatic aldehydes and ketones. We pointed out previously [2] that we were not able to observe sensitized phosphorescence of naphthalene

in the presence of carbazole in spite of the favorable arrangement of their triplet levels. This is explained by the fact that the quenching of phosphorescence in carbazole is very protracted ($\tau_0 = 7.25$ sec) and it is difficult to observe phosphorescence of naphthalene ($\tau_0 = 2.3$ sec) against this background. The afterglow time of carbazole as a function of the concentration of naphthalene was studied by phosphoroscopic means in this case in order to establish the presence of energy transfer.

The interference light filter placed in front of the photomultiplier tube isolated the first band of the phosphorescence spectrum of carbazole at 4140 Å without overlapping with the afterglow spectrum of naphthalene. The results from measurements presented in Figure 1 show that the decay time of the afterglow of carbazole also decreases in the presence of an energy acceptor (naphthalene). The course of the curve is analogous to that observed in the other cases, however the magnitude of the ratio of the probability of energy transfer to the probability of radiation and deactivation from the triplet state with the same concentration of naphthalene is approximately three times as great as in the case of aromatic aldehydes and ketones. The reduction in the phosphorescence quenching time in the presence of naphthalene was also noted in diphenylamine whose decay time τ ranged from 1.85 sec when dissolved in alcohol + ether at -180° to 1.28 sec under the same conditions, but in the presence of naphthalene in a concentration of 4.3×10^{-1} mole/liter.

In order to prove that the metastable level of the molecule giving off energy should be of higher energy than the phosphorescence level of the acceptor in the case of sensitized phosphorescence, experiments were conducted which involved measuring the reduction in the decay time τ of the afterglow of benzyl whose metastable level is located at a height of $19,150 \text{ cm}^{-1}$ in the

presence of α -methyl naphthalene (refer to Table 1). When α -methyl naphthalene in a concentration of 4.6×10^{-1} mole/liter was added to the benzyl solution, the decay time τ of the benzyl changed from 4.45×10^{-3} sec to 4.3×10^{-3} sec, which does not go beyond the limits of experimental errors while the decay time τ of benzophenone changed under the same conditions from 4.7×10^{-3} to 3.5×10^{-3} sec.

This work was performed under the personal supervision of Academician A. N. Terenin. The author expresses his hearty gratitude to B. Ya. Sveshnikov for a number of valuable critical comments when discussing the article.

Submitted 10 November 1954

REFERENCES

1. A. N. Terenin, V. L. Yermolayev, DAN [Transactions of the Academy of Sciences USSR], Vol. 85, 1952, 547.
2. V. L. Yermolayev, A. N. Terenin. Sborn. pamyati S. I. Vavilova [Collected Articles Dedicated to the Memory of S. I. Vavilov], Publishing House of the Academy of Sciences USSR, 1952, page 137.
3. N. A. Tolstoy, P. P. Feofilov, DAN, Vol. 58, 1947, 389.
4. N. A. Tolstoy, P. P. Feofilov, Usp. Fiz. Nauk [Progress in the Physical Sciences], Vol. 41, 1950, 44.
5. V. Zanker, Zeitschrift Phys. Chem., Vol. 200, 1952, 250.
6. S. I. Vavilov, ZhETF [Journal of Experimental and Theoretical Physics], Vol. 13, 1943, 13; Mikrostruktura Sveta, Sobr. Soch. [The Microstructure of Light. Collected Works], Vol. 2, 1952, page 400.
7. M. D. Galanin, L. V. Levshin, ZhETF, Vol. 21, 1951, 121.
8. G. Lewis, M. Kasha, J. Amer. Chem. Soc., Vol. 66, 1944, 2100.

В. Л. ЕРМОЛАЕВ

ТУШЕНИЕ И ИЗМЕНЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СВЕЧЕНИЯ ПРИ
СЕНСИБИЛИЗОВАННОЙ ФОСФОРЕСЦЕНЦИИ АРОМАТИЧЕСКИХ
СОЕДИНЕНИЙ

(Представлено академиком А. Н. Терениным 2 XII 1954)

В данной работе была поставлена задача исследовать механизм сенсibilизованной фосфоресценции (^{1, 2}), изучая тушение люминесценции донора энергии акцептором и времена затухания люминесценции компонент.

Измерения τ люминесценции ароматических альдегидов и кетонов производились на осциллографическом фосфороскопе* системы Н. А. Толстого и П. П. Феофилова (^{3, 4}). Прибор позволяет при экспоненциально затухающей яркой люминесценции определять τ в области 10^{-3} — 10^{-4} сек. с точностью 2—3%, причем сразу исключается ошибка, вносимая более длительной фосфоресценцией нафталина. Часть измерений была сделана на двухдисковом фосфороскопе Беккереля (скорость 33 об/сек.). Время затухания длительной фосфоресценции карбазола и дифениламина измерялось при помощи двухдискового фосфороскопа (0,28 об/сек.) и фотоэлектронного умножителя ФЭУ-17, соединенного с зеркальным гальванометром М-95 чувствительностью 10^{-8} а на деление шкалы, работавшего в режиме балластного гальванометра. Для возбуждения люминесценции во всех случаях применялась ртутная лампа СВДШ-250, изображение которой при помощи кварцевого конденсора отбрасывалось на кювету с исследуемым раствором, помещенную в непосеребранный дьюаровский стакан с жидким воздухом. Для выделения группы линий у 3660 Å применялась комбинация светофильтров BG-22 (5 мм) и IG-1 (10 мм). Тушение люминесценции бензофенона нафталином при возбуждении областью спектра у 3660 Å измерялось фотоэлектронным умножителем ФЭУ-17 и гальванометром М-95 в стационарном состоянии при скрещенных светофильтрах. В качестве растворителя, образующего при низкой температуре нерастрескивающуюся стеклообразную среду, использовалась смесь 2 объемов 96% этилового спирта с 1 объемом 98% диэтилового эфира, которые предварительно очищались многократной перегонкой. Для этой смеси известен коэффициент сжатия при понижении температуры от комнатной до температуры жидкого воздуха (⁵), что позволяет вычислить истинную концентрацию раствора при -180° .

В табл. 1 представлены те вещества, с растворами которых мы наблюдали явление сенсibilизованной фосфоресценции. Для любой бинарной комбинации вещества из левой половины таблицы с веществом из правой половины имеет место безызлучательный перенос энергии от триплетных состояний молекул-доноров к молекулам-акцепто-

* Автор приносит глубокую благодарность В. А. Архангельской за предоставление возможности произвести измерения на ее установке.

рам при возбуждении только первых. Наличие такого переноса устанавливалось не только по присутствию сенсibilизованной фосфоресценции, но также по сокращению времени жизни молекул донора энергии в метастабильном состоянии в присутствии акцептора энергии. Для карбазола и дифениламина в присутствии нафталина перенос энергии удалось установить только последним методом. В табл. 1 приведены также значения величин электронных переходов с триплетного уровня на основной и измеренные в настоящей работе времена жизни молекул в триплетном состоянии.

Нам удалось показать на примере систем бензальдегид + нафталин, бензофенон + нафталин, бензофенон + α -метилнафталин, карбазол + нафталин и др., что присутствие акцептора энергии сокращает время жизни фосфоресцирующей молекулы донора энергии*.

Таблица 1

Доноры энергии	Триплетный уровень* в см^{-1}	τ , фосф. в сек.	Длинноволн. граница поглощ. в см^{-1}	Акцепторы энергии	Триплетный уровень* в см^{-1}	τ , фосф. в сек.	Длинноволн. граница поглощ. в см^{-1}
1 Бензальдегид	25200	$1,5 \cdot 10^{-3}$	26750	1 Нафталин	21300	2,30	31000
2 Бензофенон	24200	$4,7 \cdot 10^{-3}$	26000	2 Дифенил	22800	4,4	34000
3 Ацетофенон	25850	$2,3 \cdot 10^{-3}$	27500	3 α -метилнафталин	21200**	—	30500
4 Этилфенилкетон	—	$3,7 \cdot 10^{-3}$	27500	4 α -хлорнафталин	20700**	0,30	—
5 <i>o</i> -оксибензальдегид	24600	—	26000				
6 Бензоин	25650	$2-4 \cdot 10^{-3}$	28000				
7 Дифениламин	25200**	1,85	31000				
8 Карбазол	24480**	7,25	29500				

* Высота триплетного уровня над основным определялась по положению максимума первой самой коротковолновой полосы спектра фосфоресценции, полученного лампой на спектрофотометрической установке, состоящей из стеклянного монохроматора и фотоумножителя.

** Данные взяты из работы (6).

Основная трудность при измерениях сокращения τ состояла в создании достаточно высоких концентраций акцептора энергии; наивысшая доступная нам концентрация нафталина была $4 \cdot 10^{-1}$ мол/л, в ее присутствии τ бензофенона сокращается на 25%. Более подходящим веществом оказался α -метилнафталин, растворимость которого значительно выше растворимости нафталина.

На рис. 1, а приведена зависимость постоянной времени затухания фосфоресценции бензофенона от концентрации α -метилнафталина. Ве-

* Согласно представлениям, развитым С. И. Вавиловым (6, 7), при резонансной миграции энергии электронного возбуждения в флуоресцирующих растворах имеют место два процесса: 1) резонансное взаимодействие между молекулами, зависящее от времени; 2) „статическое взаимодействие“, от времени не зависящее. Следствием из предположения о наличии первого процесса является вывод о сокращении τ люминесценции вещества, отдающего энергию. Поскольку такое наблюдается в нашем случае, мы можем говорить о резонансном взаимодействии, развертывающемся во времени, между молекулами донора и акцептора энергии при сенсibilизованной фосфоресценции.

личина $\frac{\tau_0 - \tau}{\tau}$
нию вероят
к первонач
донора энер
характеризу
стет линейн
концентраци
растет быс
можно опис



ределения τ
талина знач
вследствие
донора энер
тухания для
нафталина.

На рис.
личных кон
растворах.
По оси орд
ной $\frac{I_0 - I}{I}$ (г

сивность в
тастабильно
тушение рас
быстрее ве.

гин возбуж
ра энергии,
процесс туг

Наблюда
ничивается
указывали,
пенцию наф
ное располо
затухание τ
и на ее фог
= 2,3 сек.).

го переноса устан-
 вленной фосфорес-
 молекул донора
 акцептора энергии.
 нафталина перенос
 методом. В табл. 1
 переходов с три-
 плетной работе време-
 нной.
 бензальдегид + нафта-
 лин, карбазол, карба-
 зол, энергия сокращает
 время жизни *.

Таблица 1

τ_0 фосф. в сек.	Длино- волн. граница поглощ. в см ⁻¹
2,30 4,4	31000 34000
—	30500
0,30	—

положению максиму-
 м, полученного нами
 монохроматора и

состояла в со-
 держании; наивыс-
 шей — 10⁻¹ мол/л, в ее
 не подходящим
 которого значи-
 тельно затухания
 нафталина. Ве-

при резонансной
 растворах имеют
 улами, зависящее
 щее. Следствием
 окрашивания τ лю-
 минесценции в на-
 рушающемся во
 времени фос-

величина $\frac{\tau_0 - \tau}{\tau}$, отложенная по оси ординат, пропорциональна отноше-
 нию вероятности переноса и тушения, развертывающихся во времени,
 к первоначальной вероятности перехода с фосфоресцентного уровня
 донора энергии на нормальный. Из рис. 1 видно, что эта величина,
 характеризующая относительную вероятность переноса энергии, ра-
 стет линейно с увеличением концентрата акцептора энергии в области
 концентраций последнего меньших $5 \cdot 10^{-1}$ мол/л. Далее эта величина
 растет быстрее, однако определить, какой функцией концентрации
 можно описать эту зависимость, затруднительно, так как точность оп-

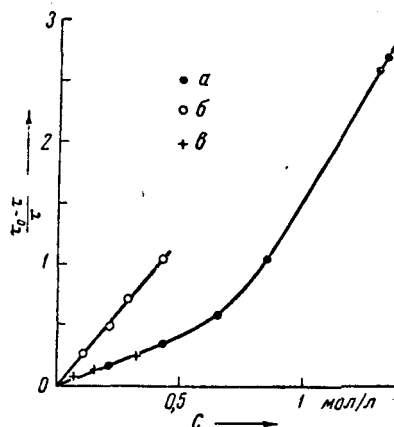


Рис. 1

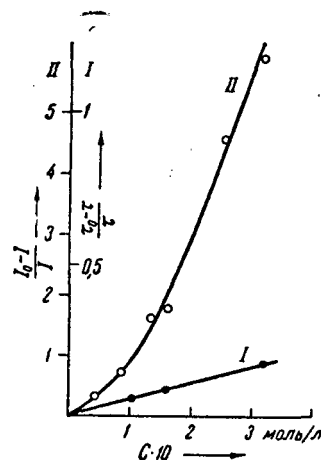


Рис. 2

ределения τ в присутствии столь высоких концентраций α -метилнафта-
 лина значительно ниже, чем при малых концентрациях последнего
 вследствие одновременного очень сильного тушения люминесценции
 донора энергии. На рис. 1 приведены также зависимости времени за-
 тухания для карбазола (б) и для бензальдегида (в) от концентрации
 нафталина.

На рис. 2 сопоставлено тушение бензофенона нафталином при раз-
 личных концентрациях нафталина (II) и сокращение τ (I) в тех же
 растворах. Концентрация бензофенона постоянна и равна $5 \cdot 10^{-2}$ мол/л.
 По оси ординат отложены величина тушения, определяемая величи-
 ной $\frac{I_0 - I}{I}$ (где I_0 — интенсивность в отсутствие тушителя, I — интен-
 сивность в присутствии нафталина), и сокращение времени жизни ме-
 тастабильного состояния бензофенона $\frac{\tau_0 - \tau}{\tau}$. То обстоятельство, что
 тушение растет с увеличением концентрации нафталина значительно
 быстрее величины $\frac{\tau_0 - \tau}{\tau}$, показывает, что наряду с переносом энер-
 гии возбуждения и связанным с ним тушением люминесценции доно-
 ра энергии, развертывающимся во времени, имеет место мгновенный
 процесс тушения донора акцептором.

Наблюдение явления сенсibilизированной фосфоресценции не огра-
 ничивается ароматическими альдегидами и кетонами. Ранее (?) мы
 указывали, что не удается наблюдать сенсibilизированную фосфорес-
 ценцию нафталина в присутствии карбазола, несмотря на благоприят-
 ное расположение их триплетных уровней. Это объясняется тем, что
 затухание фосфоресценции карбазола весьма длительно ($\tau_0 = 7,25$ сек.)
 и на ее фоне трудно наблюдать фосфоресценцию нафталина ($\tau_0 =$
 $= 2,3$ сек.). Для установления наличия переноса энергии в данном

случае было изучено фосфороскопически время послесвечения карбазола в зависимости от концентрации нафталина.

Интерференционный светофильтр, поставленный перед фотоумножителем, выделял первую полосу спектра фосфоресценции карбазола у 4140 Å, не перекрывающихся со спектром послесвечения нафталина. Результаты измерений, представленные на рис. 1, показывают, что τ послесвечения карбазола также уменьшается в присутствии акцептора энергии (нафталин). Ход кривой аналогичен наблюдаемой в других случаях, однако величина отношения вероятности переноса энергии к вероятности излучения и дезактивации с триплетного состояния при одинаковой концентрации нафталина приблизительно в 3 раза больше, чем в случае ароматических альдегидов и кетонов. Сокращения времени затухания фосфоресценции в присутствии нафталина обнаружил также дифениламин, τ которого меняется от 1,85 сек. для его раствора в спирту + эфир при -180° до 1,28 сек. в тех же условиях, но в присутствии нафталина в концентрации $4,3 \cdot 10^{-1}$ мол/л.

Для доказательства того, что в случае сенсibilизованной фосфоресценции необходимо, чтобы метастабильный уровень молекулы, отдающей энергию, был энергетически выше фосфоресцентного уровня акцептора, были проделаны опыты с измерением сокращения τ послесвечения бензила, метастабильный уровень которого расположен на высоте 19150 см^{-1} , в присутствии α -метилнафталина (см. табл. 1). При прибавлении к раствору бензила α -метилнафталина в концентрации $4,6 \cdot 10^{-1}$ мол/л τ бензила изменялось с $4,45 \cdot 10^{-3}$ до $4,3 \cdot 10^{-3}$ сек., что не выходит за пределы экспериментальных ошибок, в то время как τ бензофенона изменялось в тех же условиях с $4,7 \cdot 10^{-3}$ до $3,5 \cdot 10^{-3}$ сек.

Настоящая работа выполнялась под личным руководством акад. А. Н. Теренина. Автор выражает сердечную благодарность Б. Я. Свешникову за ряд ценных критических замечаний при обсуждении статьи.

Поступило
10 XI 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Н. Теренин, В. Л. Ермолаев, ДАН, 85, 547 (1952). ² В. Л. Ермолаев, А. Н. Теренин, Сборн. памяти С. И. Вавилова, Изд. АН СССР, 1952, стр. 137. ³ Н. А. Толстой, П. П. Феофилов, ДАН, 58, 389 (1947). ⁴ Н. А. Толстой, П. П. Феофилов, Усп. физ. наук, 41, 44 (1950). ⁵ V. Zanker, Zs. phys. Chem., 200, 250 (1952). ⁶ С. И. Вавилов, ЖЭТФ, 13, 13 (1943); Микроструктура света, Собр. соч., 2, 1952, стр. 490. ⁷ М. Д. Галанин, Л. В. Левшин, ЖЭТФ, 21, 121 (1951). ⁸ G. Lewis, M. Kasha, J. Am. Chem. Soc., 66, 2100 (1944).

СООТ

При ст
сто превр
цессы пре
стицы. Пр

Из зар
ных сечен

w_1

Если п
но установ
учтем, что
ствующий
изотопичес

Здесь u_1^i
пространст
мезонов в
топическог
энергии ст
ла вылета
введен для
Вместо
 u^+ согласо

u^0, u^+ и u^-
соответств
нимает сле

$-\beta \{\tau_0(u_2^+)$

Здесь $\tau = 1$

* \tilde{p} и \tilde{n} .